

Beschreibung

Spannungs-Strom-Wandler mit einstellbarem Ruhestrom

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Steuerung eines Ausgangssignals einer Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung, bei der ein eingangsseitig angelegtes Spannungssignal in ein Stromsignal gewandelt wird.
- 10 Ein wichtiges Maß für die Güte von Kommunikationssystemen ist die Nachbarkanalleistung oder das sogenannte "Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)". Diese gibt bei einer festen Gesamtleistung das Verhältnis zwischen einer abgestrahlten Leistung in einem Nutzkanal und in einem Nachbarkanal an. Die
- 15 Hauptursache für die an sich nicht gewünschte Leistung im Nachbarkanal sind Nichtlinearitäten in aktiven Bauelementen, wie beispielsweise Verstärkerstufen. Diese erzeugen unter bestimmten Bedingungen Verzerrungen oder Intermodulationen, was zu einem Anstieg der Nachbarkanalleistung führt. Besonders
- 20 betroffen hiervon sind moderne Kommunikationssysteme, wie beispielsweise WCDMA, die aufgrund ihrer verwendeten Modulationsart ein rauschähnliches Signal erzeugen.

- Im allgemeinen besitzen rauschähnliche Signale einen hohen
- 25 Crestfaktor, d.h. die Differenz des gemittelten Leistungswerts eines solchen rauschähnlichen Signals zu dem höchsten vorkommenden Leistungswert im Signal ist sehr groß. Für aktive Bauelemente, insbesondere Verstärkerstufen, ist es daher notwendig, die auftretenden hohen Spannungsspitzen weiterhin
- 30 linear verarbeiten zu können. Andernfalls führt eine nichtlineare Verarbeitung zur Kompression und zu Intermodulationsprodukten, was die Leistung im Nachbarkanal erhöht. Da Intermodulationsprodukte bzw. ein schlechter ACLR-Wert nur sehr aufwendig kompensiert werden kann, ist es erforderlich, in
- 35 der gesamten Signalkette die notwendigen Linearitätsanforderungen einzuhalten, die an die aktiven Bauelemente gestellt werden.

Figur 3 zeigt einen Spannungs-Strom-Konverter, der Bestandteil eines Mischers ist, mit dem ein Signal auf eine Trägerfrequenz moduliert wird. Den entsprechenden Aufbau eines solchen Gesamtsystems läßt sich beispielsweise dem Dokument
5 "Benjamin Sam, Phillip Halford, High-Performance Quadrature Modulators for Broadband Wireless Communication, IEEE 2001" entnehmen.

10 Der darin beschriebene Spannungs-Strom-Konverter weist zwei Eingänge I und IX auf, an denen die positive bzw. negative Halbwelle eines Anteils des Basisbandsignals anliegt. Die Ausgänge der Operationsverstärker OP sind mit der Basis der jeweiligen Transistoren verbunden. Somit steuert das am Operationsverstärker anliegende Signal mit Hilfe der Stromspiegel
15 I_0 den Kollektorstrom am Kollektorausgang A.

Um hohe Signalpegel mit guter Linearität übertragen zu können, muß der Bias-Strom I_0 so gewählt werden, daß er mindestens dem Spitzenwert des Signalstroms entspricht, der bei einem maximalen Eingangssignal erzeugt wird. Besitzt das Eingangssignal einen hohen Crestfaktor, wie er bei W-CDMA-Signalen vorkommt, ergibt sich in dem üblicherweise verwendeten Klasse A-Betrieb ein hoher Bias-Strom.
20

25 Dieses Vorgehen steht im Gegensatz zur Forderung nach einem möglichst geringen Stromverbrauch, der eine Voraussetzung für den Einsatz in mobilen Geräten mit nur geringem Energiespeicher darstellt.

30 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren sowie eine Anordnung in einem Spannungs-Strom-Konverter vorzusehen, mit dem eine ausreichende Linearität bei gleichzeitig geringem Stromverbrauch ermöglicht ist.

35 Diese Aufgabe wird mit Merkmalen der nebengeordneten Patentansprüche gelöst.

Darin ist ein Verfahren und eine Anordnung zur Steuerung eines Ausgangssignals einer Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung vorgesehen, denen eine Referenzspannung zugeführt wird und
5 mit denen ein eingangsseitig angelegtes Spannungssignal in ein Stromsignal gewandelt wird. Es ist eine Referenzspannung vorgesehen, die den Ausgangsruhestrom einstellt. Dadurch läßt sich der Ausgangsruhestrom gegebenenfalls reduzieren, ohne daß die Linearität der gesamten Schaltung wesentlich beeinträchtigt wird.
10

Eine Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung weist einen Spannungseingang und einen Stromausgang sowie einen Referenzeingang auf, wobei eine Spannung am Referenzeingang einen Ruhestrom
15 am Stromausgang einstellt und die Spannung am Referenzeingang veränderbar ist. Es ist vorteilhaft, eine Einstelleinrichtung vorzusehen, die mit dem Referenzeingang der Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung verbunden ist und durch die eine Einhüllende eines amplitudenmodulierten Eingangssignals ermittelbar
20 ist.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

25 In einer Weiterentwicklung des Verfahrens folgt die Referenzspannung einem Spannungswert einer einhüllenden Kurve des eingangsseitig angelegten Spannungssignals. Somit wird im zeitlichen Mittel der Ruhestrom reduziert, während sich die Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung weiterhin in einem A-Betriebsmodus befindet.
30

In einer zweiten Ausgestaltung der Erfindung wird die Referenzspannung so eingestellt, daß durch Absenken der Referenzspannung die Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung in einen B-Betriebsmodus oder in einen AB-Betriebsmodus übergeht.
35

Es ist ferner zweckmäßig die Einstelleinrichtung als Pegeldetektor auszubilden. Vorteilhaft ist es ebenso, die Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung differentiell auszubilden.

5 Im folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen im Detail erläutert. Es zeigen:

Figur 1 ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung,

10

Figur 2 ein zweites Ausführungsbeispiel,

Figur 3 eine bekannte Ausführungsform eines Spannungs-Strom-Konverters.

15

Figur 1 zeigt eine differentielle Ausführungsform eines Spannungs-Strom-Konverters, der Bestandteil einer hier nicht gezeigten Modulationseinrichtung ist. Die Spannungs-Strom-Umsetzeinrichtung weist einen Operationsverstärker OP auf, dessen invertierender Ausgang mit der Basis eines Transistors T1 und dessen nicht invertierender Ausgang mit der Basis eines Transistors T2 verbunden ist. Die Emitterausgänge der Transistoren T1 und T2 sind über einen Widerstand R_E mit Masse verbunden. Die Widerstände R_E sind Teil einer Stromquelle. Die Kollektorausgänge A der Transistoren T1 und T2 führen zu einem hier nicht gezeigten Mischer, der das Ausgangssignal der Transistoren T1 und T2 auf eine andere Frequenz umsetzt.

20

25

Der Emitterausgang des Transistors T1 ist über einen Widerstand R_{FB} mit dem nicht invertierenden Eingang „+“ des Operationsverstärkers OP verbunden. Der Emitter des Transistors T2 ist gleichermaßen mit dem invertierenden Eingang „-“ des Operationsverstärkers verbunden. Die beiden Eingänge des Operationsverstärkers sind jeweils mit einem Widerstand R_{FF} und diese mit den Ausgängen einer Detektionseinrichtung DE verbunden. An den Eingängen der Detektionseinrichtung DE liegt das Signal I bzw. das invertierte Signal IX an.

30

35

Der Operationsverstärker OP weist ferner einen Eingang zu einer Referenzspannung auf, der mit einer einstellbaren Spannungsquelle U_{REF} verbunden ist. Die Spannungsquelle U_{REF} ist
5 ihrerseits durch eine Leitung PA zur Einstellung der Spannung mit der Detektionseinrichtung DE verbunden. Dadurch bilden sie eine Einstelleinrichtung zum Einstellen der Referenzspannung abhängig von der Signalamplitude des Eingangssignals.

10 Während des normalen Betriebes wird an der Spannungsquelle U_{REF} eine Spannung so eingestellt, daß die Basis der beiden Transistoren mit einer Spannung so vorgespannt ist, daß sich ein konstanter Bias-Strom bzw. ein Ruhestrom I_0 über die Widerstände R_E einstellt. Durch diesen Ruhestrom arbeiten die
15 Transistoren im linearen Bereich.

Im normalen Betriebsmodus ohne die Detektionseinrichtung DE erzeugt ein Signal, das am Eingang I angelegt ist, eine Spannungsänderung am nicht invertierenden Ausgang „+“ des Operationsverstärkers OP. Steigt das Signal am Eingang I gegenüber
20 IX an, so steigt die Basisspannung an T2 an, die Basisspannung an T1 sinkt um den gleichen Betrag. Dadurch steigt der durch T2 fließende Strom, während der durch T1 fließende Strom sinkt. Die Summe aus beiden Strömen bleibt dabei weiterhin gleich der Summe der Ruhestrome I_0 durch beide Transistoren unter Vernachlässigung der Basisströme. Ist in der
25 nächsten Halbwelle der Eingang IX aktiv und größer als I, ändert sich aufgrund der Spannungsänderung an der Basis der Transistoren T1 und T2 der durch die Transistoren fließende
30 Strom in die andere Richtung.

Diese Stromänderung ist direkt proportional zur Amplitude des am Eingang I bzw. IX angelegten Signals. Somit wird eine Eingangsspannung linear auf einen Ausgangsstrom umgesetzt. Durch
35 die Widerstände R_{FB} und R_{FF} wird das Verhältnis der über die Widerstände R_E der beiden Transistoren abfallende Spannung eingestellt. Die Spannungsdifferenz zwischen I und IX wird

dadurch abhängig vom Verhältnis von R_{FB} zu R_{FF} ein Vielfaches der Spannungsdifferenz zwischen den Emitterspannungen T1 und T2 und damit der Emitterströme.

5 Ist die Detektionseinrichtung DE aktiv, so ermittelt sie den Hüllkurvenwert eines angelegten Signals an I bzw. IX. Dieser Hüllkurvenwert ist ein Maß für die zu diesem Zeitpunkt maximale Amplitude der Spannung am Eingang I bzw. IX. Der ermittelte Wert wird über die Verbindung PA weitergereicht.

10

Daher kann die Referenzspannung U_{REF} reduziert werden, so daß sich auch der durch die Transistoren T1 und T2 fließende Ruhestrom I_0 reduziert. Dennoch ist der Ruhestrom noch größer als das momentan angelegte Eingangssignal, so daß beim Anliegen des Eingangssignals I bzw. IX die Linearität zwischen Eingangsspannung und Ausgangsstrom erhalten bleibt. In der
15 nächsten Halbwelle wird das Eingangssignal erneut gemessen und die Referenzspannung entsprechend geändert. Dieser Betriebsmodus der Anordnung wird als A-Betriebsmodus bezeichnet.
20

Sei beispielsweise die Spannungsverstärkung der Operationsverstärkerschaltung gleich 1 und die Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen I und IX 2mV. Die Anordnung befindet sich
25 in einem A-Betriebsmodus, wenn der Ruhestrom I_0 durch beide Transistoren T1 und T2 einer Spannung an den Emitttern von T1 und T2 von beispielsweise 6mV entspricht. In einem solchen Fall fließt nach Anliegen eines solchen Eingangssignals an der Operationsverstärkerschaltung OP durch die Transistoren ein
30 Strom, der einer Spannung von 7mV, bzw. 5mV entspricht. Beide Transistoren T1 und T2 sind weiterhin stromführend und damit im A-Betriebsmodus.

Da die Durchschnittsspannung des Eingangssignals um den
35 Crestfaktor geringer als die maximal vorkommende Eingangsspannung ist, wird bei diesem Verfahren auch der durchschnittliche Bias-Strom deutlich geringer ausfallen als der

im herkömmlichen Betrieb benötigte Bias-Strom, der mindestens dem durch den maximalen Spannungswert vorgegebenen Strom entspricht. Somit wird der Stromverbrauch deutlich reduziert.

5 Beträgt beispielsweise der Crestfaktor 6 dB, d.h. die maximale Leistung ist 6 dB größer als die Durchschnittsleistung, so ist der durchschnittliche Ruhestrom um den Faktor 2 geringer als der maximale Ruhestrom.

10 Die Detektionseinrichtung DE ist als einfacher Pegeldetektor ausgebildet. Dieser Pegeldetektor ermittelt zum Zeitpunkt des Eingangssignals die Amplitude. Somit folgt die Referenzspannung U_{REF} der einhüllenden Kurve des Eingangssignals.

15 Eine zweite Ausgestaltung der Erfindung zeigt Figur 2. Gleiche Bauelemente tragen dabei gleiche Bezugszeichen, wobei auf eine erneute Erläuterung verzichtet wird. Die Emitter der Transistoren T1 und T2 weisen hier eine Verbindung zu den Widerständen R1 bzw. den Kondensatoren C1 auf. Die Kondensatoren sind wiederum mit den Widerständen R2 bzw. den Eingängen
20 des Operationsverstärkers OP verbunden. Die andere Seite der Widerstände R2 ist mit dem Widerstand R_{FF} bzw. dem Widerstand R1 verbunden. Des weiteren sind die Widerstände R2 über eine Kapazität C miteinander verbunden. Zusätzlich weist der Spannungs-Strom-Konverter eine Pufferschaltung B auf, die ihrerseits einen Operationsverstärker OP1 enthält. Ein Eingang des Operationsverstärkers OP1 ist mit dem jeweils komplementären Ausgang über einen Kondensator C2 und einen dazu parallelen Widerstand R3 mit einem nachfolgenden Schalter S1 verbunden.
25 Um eine Spannungssteuerung des Pufferverstärkers zu erreichen, sind vor dem Operationsverstärker OP1 in beide Signalfade Widerstände R4 geschaltet.
30

35 Die Widerstände R1, R2 und die Kondensatoren C1 und C bilden einen Tiefpaß zweiter Ordnung, um das Rauschen aller Widerstände und der Operationsverstärker zu reduzieren. Zusätzlich bilden sie ein "Reconstruction Filter" für den hier nicht gezeigten Digital-Analog-Konverter, der die digitalen Eingangs-

signale I bzw. IX in analoge Signale umwandelt. Die dabei entstehenden Wiederholspektren werden durch das Rekonstruktionsfilter ebenfalls unterdrückt. Da die Widerstände R_1 , R_2 und R_{FF} im allgemeinen niederohmig sind, ist es notwendig,
5 die hochohmige Pufferschaltung B vorzusehen, damit der Digital-Analog-Konverter ein korrektes Signal erzeugen kann.

In dieser Schaltung wird die Referenzspannung U_{REF} reduziert, bis die Transistoren T1 bzw. T2 sperren. Dadurch verschwindet
10 der Referenzruhestrom I_0 durch die Transistoren, falls am Eingang I oder IX kein Signal anliegt. Der nachfolgende hier nicht gezeigte am Ausgang der Transistoren angelegte Schaltungsblock verbraucht somit keinen zusätzlichen Strom.

15 Wird am Eingang I ein positives Signal angelegt, so werden die Signalfade durch den ersten Operationsverstärker OP1 der Puffereinrichtung B vertauscht. Das Signal I gelangt an den invertierenden „-“ Eingang des Operationsverstärker OP, Das Signal IX an den nichtinvertierenden Eingang „+“. Um die
20 Spannungsdifferenz zwischen I und IX auszugleichen, erhöht der Operationsverstärker OP die Basisspannung am Transistor T1 und senkt sie an T2. Dadurch fließt durch den Transistor T1 ein Strom. Dieser wird so groß, bis die daraus resultierende Spannungsdifferenz zwischen den Emittern von T1 und T2
25 die Spannungsdifferenz zwischen I und IX ausgeglichen hat. Dabei sperrt der Transistor T2 weiterhin. Da eine Absenkung der Basisspannung an T2 nicht weiter zu einer Stromabsenkung über T2 führen kann, muß der Operationsverstärker einen entsprechend große Spannungsbereich aufweisen, um die im Eingangssignal vorkommenden Spannungsdifferenzen auszugleichen.
30

Liegt am Eingang IX ein positives Signal an, so schaltet der Transistor T2, während die Basis des Transistors T1 weiterhin im sperrenden Zustand verbleibt. Bezogen auf eine Taktperiode
35 des Eingangssignals, die aus der Signaldauer von I und IX zusammengesetzt ist, bedeutet dies, daß ein Transistor jeweils nur eine halbe Taktperiode leitend geschaltet ist, also nur

während der Dauer des Signals I oder IX. Dieser Betriebsmodus wird als B-Betriebsmodus bezeichnet.

Im für den Betriebsmodus A genannten Beispiel muß bei einem verschwindenden Ruhestrom I_0 im B-Betriebsmodus der Operationsverstärker einen Spannungsbereich von mindestens 2mV für beide Ausgänge regeln können, um die Eingangsspannungsdifferenz von 2mV richtig abzubilden.

Bei npn-Bipolartransistoren ist eine positive Basis-Emitterspannung von ca. 0,7 V notwendig, um den Transistor in einen leitenden Betrieb zu bringen. Wird die Referenzspannung kleiner als die maximal vorkommende Eingangsamplitude aber noch größer als 0.7V eingestellt, entspricht dies einem AB-Betriebsmodus. Der kleine Ruhestrom, der auch bei keinem Eingangssignalsignal durch die Transistoren fließt, ermöglicht bei einem anliegenden Signal, daß ein Transistor länger als eine halbe Taktperiode aber weniger als eine ganze Periode leitend ist.

20

Beispielsweise kann der Ruhestrom I_0 einem Spannungsabfall über R_E von 1mV entsprechen. Bei einer Spannungsdifferenz der Eingänge von 2mV arbeitet die Anordnung im Grenzbereich zwischen A- und AB- Betriebsmodus. Ein reiner AB-Betriebsmodus liegt bei einem Ruhestrom I_0 vor, der einem Ruhespannungsabfall über R_E von 0.5mV entspricht und die Eingangsdifferenz weiterhin 2 mV beträgt.

Der Erfindung liegt die Idee zugrunde, den Ruhestrom eines Spannungs-Strom-Umsetzers gezielt durch Veränderung der Referenzspannung zu reduzieren, ohne dabei die lineare Übertragungsfunktion zu verzerren. Dabei ist das hier dargestellte Verfahren im A- oder B-Betriebsmodus nicht auf differentielle Spannungs-Strom-Umsetzer beschränkt. Es ist somit denkbar, ein nicht differentielles Eingangssignal zu verwenden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung eines Ausgangssignals (A) einer Spannungs-Stromumsetzeinrichtung, der eine Referenzspannung
5 zugeführt und bei der ein eingangseitig angelegtes Differenzspannungssignal in ein Differenzstromsignal gewandelt wird,
dadurch gekennzeichnet, dass
 - eine Referenzspannung zur Einstellung eines Ausgangsruhestrom (I_0) eingestellt wird;
 - 10 - eine Einhüllende des eingangsseitig angelegten Signals ermittelt wird;
 - die Referenzspannung in Abhängigkeit der Einhüllenden verändert wird;
 - das Differenzspannungssignal um einen Faktor verstärkt
15 wird;
 - das verstärkte Differenzspannungssignal in ein Stromsignal gewandelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
20 dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzspannung (U_{REF}) einem Spannungswert einer Einhüllenden des eingangsseitig angelegten Spannungssignals folgt, so daß sich die Spannungs-Stromumsetzeinrichtung in einem A-Betriebsmodus befindet.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzspannung (U_{REF}) so eingestellt wird, daß sich die Spannungs-Stromumsetzeinrichtung in einem B-Betriebsmodus
30 oder in einem AB-Betriebsmodus befindet.
4. Spannungs-Stromumsetzeinrichtung, umfassend:
 - einen Spannungseingang mit einem ersten Anschluss (I) und einem zweiten Anschluss (IX);
 - 35 - einen Stromausgang (A) mit einem ersten und einem zweiten Anschluss;

- einen mit dem ersten Anschluss des Stromausgangs verbundenen ersten Transistor (T1) und einem mit dem zweiten Anschluss des Stromausgangs verbundenen zweiten Transistor (T2);
- 5 - einen Operationsverstärker mit einem ersten Eingang(+), der mit dem ersten Anschluss (I) gekoppelt ist, mit einem zweiten Eingang (-), der mit dem zweiten Anschluss (IX) gekoppelt ist, mit einem ersten Ausgang (+), der mit einer Basis des zweiten Transistors (T2) gekoppelt ist und mit
10 einem zweiten Ausgang (-), der mit einer Basis des ersten Transistors (T1) gekoppelt ist, wobei der Operationsverstärker (OP) einen Referenzeingang aufweist und mittels einer Spannung am Referenzeingang ein Ruhestrom am Stromausgang (A) einstellbar ist;
- 15 g e k e n n z e i c h n e t d u r c h eine Einstelleinrichtung (DE), die mit dem Referenzeingang zur Zuführung einer Regelspannung gekoppelt ist und durch die eine Einhüllende eines amplitudenmodulierten Signals am Eingang (I, IX) ermittelbar ist.
- 20
- 5. Spannungs-Stromumsetzeinrichtung nach Anspruch 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t d a s s die Einrichtung einen Pegeldetektor aufweist.
- 25 6. Spannungs-Stromumsetzeinrichtung nach Anspruch einem der Ansprüche 4 bis 5, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , d a s s eine regelbare Spannungsquelle vorgesehen ist, deren Ausgang mit dem Referenzeingang des Operationsverstärkers (OP) verbunden ist, und die einem mit der Einstelleinrichtung (DE) verbundenen Regeleingang umfasst.
- 30
- 7. Spannungs-Stromumsetzeinrichtung nach Anspruch einem der Ansprüche 4 bis 6, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , d a s s
35 die Transistoren (T1, T2) der Spannungs-Stromumsetzeinrichtung durch den durch den Operationsverstär-

ker (OP) einstellbaren Ruhestrom (I_0) in einem A-, B- oder AB-Betriebsmodus betreibbar ist.

8. Spannungs-Stromumsetzeinrichtung nach einem der Ansprüche

5 4 bis 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , d a s s
zwischen erstem Eingang der Operationsverstärkers (OP) und
Emitter des ersten Transistors (T1) eine erste Last (R_{FB1})
und zwischen zweitem Eingang der Operationsverstärkers (OP)
10 und Emitter des zweiten Transistors (T2) eine erste Last
(R_{FB2}) geschaltet ist.

Zusammenfassung

Spannungs-Strom-Wandler mit einstellbarem Ruhestrom

- 5 Verfahren zur Steuerung eines Ausgangssignals (A) einer Spannungs-Stromumsetzeinrichtung, dem eine Referenzspannung (U_{REF}) zugeführt und bei der ein eingangseitig angelegtes Spannungssignal (I, IX) in ein Stromsignal gewandelt wird, wobei eine Referenzspannung (U_{REF}) den Ausgangsruhestrom (I_0)
- 10 einstellt. Zweckmäßig ist weiterhin die Vorsehung eine Einstelleinrichtung, die mit dem Referenzeingang verbunden ist und durch die eine Einhüllende eines amplitudenmodulierten Signals am Eingang ermittelt wird.
- 15 Figur 1

Bezugszeichen:

	(OP, OP1) :	Operationsverstärker
	(I, IX) :	Eingangssignal
5	(DE) :	Pegeldetektionseinrichtung
	(PA) :	Leitung
	(R _{FF} , R _{FB}) :	Widerstände
	(R _E) :	Stromquellenwiderstand
	(U _{REF}) :	Referenzspannung
10	(T1, T2) :	Transistoren
	(A) :	Kollektor
	(I ₀) :	Stromspiegel
	(R1, R2) :	Widerstände des Tiefpasses
	(C1, C) :	Kondensatoren des Tiefpasses
15	(C2) :	Kondensatoren
	(R3, R4) :	Widerstände
	(S1) :	Schalter